

**VŠB – Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

2013

Martin Vánský

**VŠB – Technická univerzita Ostrava**

**Fakulta elektrotechniky a informatiky**

**Katedra elektroenergetiky**

**Kompensace jalového výkonu v průmyslových  
a distribučních sítích.**

**Reactive Power Control in Industrial and  
Distribution Networks.**

2013

Martin Vánský

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra elektroenergetiky

## Zadání bakalářské práce

Student: **Martin Vánský**  
Studijní program: B2649 Elektrotechnika  
Studijní obor: 3907R001 Elektroenergetika  
Téma: **Kompensace jalového výkonu v průmyslových a distribučních sítích.**  
**Reactive Power Control in Industrial and Distribution Networks.**

Zásady pro vypracování:

1. Teoretický rozbor průmyslových a distribučních sítí
2. Možnosti kompenzace jalového výkonu
3. Technické prostředky kompenzace
4. Stanovení parametrů kompenzačního prostředku.
5. Příklad návrhu kompenzace.

Seznam doporučené odborné literatury:


1. Santarius, P.: Elektrické stanice a vedení, Skripta VŠB-TU Ostrava, 1990
2. Hodinka, M.: Přenos a rozvod elektrické energie, SNTL, 1989
3. Trojánek, Z.: Přechodné jevy v elektrizačních soustavách, SNTL 1987
4. Dohnálek, P.: Ochrany pro průmysl a energetiku, SNTL, 1991
5. Normy, firemní literatura, předpisy a směrnice ČEZ,a.s.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **doc. Dr.Ing. Jiří Gurecký**

Datum zadání: 30.11.2012

Datum odevzdání: 07.05.2013

  
prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.  
vedoucí katedry



  
prof. RNDr. Václav Šnášel, CSc.  
děkan fakulty

**Čestné prohlášení studenta:**

Čestně prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval sám. Uvedl jsem všechny literární prameny, publikace a internetové stránky, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne: 7.5.2013

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Bamshy'.

### **Poděkování:**

Rád bych vyjádřil poděkování váženému panu konzultantovi doc. Dr. Ing. Jiřímu Gureckému za čas, který mi věnoval, ale i za trpělivost, kterou se mnou měl, a za jeho cenné rady, které výraznou mírou dopomohly ke zkvalitnění úrovně mé bakalářské práce. Poděkování také patří mé rodině a blízkým, kteří mě celou dobu podporovali.

**Abstrakt:**

V práci je shrnuta problematika týkající se kompenzace jalového výkonu na hladině nízkého a vysokého napětí. Teoretická část se zaměřuje na vysvětlení základních otázek kompenzace jalového výkonu a popis průmyslových a distribučních elektrických sítí. Je zmíněna spolehlivost elektrických sítí a rozdělení elektrických výkonů. V práci jsou popsány důvody kompenzace účinníku a požadavky na jeho dodržování. V práci je uvedeno základní rozdělení všech druhů kompenzace s popisem jednotlivých možností. Také jsou popsány možnosti řízení kompenzace. V praktické části je řešen demonstrační teoretický příklad kompenzace účinníku a také praktický příklad s reálnou problematikou průmyslového odběratele elektrické energie.

**Klíčová slova:**

kompenzace jalového výkonu, účinník, jalový výkon, distribuční síť, průmyslová síť, kompenzační kondenzátory, regulátory jalového výkonu

**Abstract:**

In the work there are summarized issues related to reactive power compensation at the low and high voltage. The theoretical part focuses on explaining of the fundamental questions of reactive power compensation and a description of the industrial and electrical distribution networks. It mentioned the reliability of electrical networks and distribution of electrical power. In the work there are described the reasons for power factor correction and requirements for its compliance. In the work there is described the distribution of all types of compensation with a description of each option. There are also described the possibilities of control compensation. In the practical part there is the demonstrative theoretical example of power factor correction and also a practical example with the real problems of industrial consumers of electricity.

**Keywords:**

power factor correction, power factor, reactive power, distribution network, industrial network, capacitors for power factor correction, power factor regulators

## Seznam použitých symbolů a zkratek

$a$	Vzdálenost mezi vodiči
$B_K$	Kapacitní susceptance
$\cos\varphi$	Účinník
$C_K$	Kapacita vedení
$C_Y$	Kapacita kondenzátoru při zapojení do hvězdy
$C_D$	Kapacita kondenzátoru při zapojení do trojúhelníku
ČEPS	Česká přenosová soustava (ČEPS, a.s.)
ČEZ	České energetické závody (ČEZ, a.s.)
$D_S$	Střední vzdálenost vodičů při zrcadlení
$d_S$	Střední vzdálenost vodičů
$G_K$	Svodová vodivost
$I$	Proud procházející vedením
$I_{\xi}$	Činný proud
$I_K$	Kompenzační proud
$I_{JK}$	Jalový kapacitní proud
$I_j$	Jalový proud
$I_{\text{stator}}$	Statorový proud synchronního stroje
$I_{L\max}$	Maximální proud cívky
$I_C$	Proud kondenzátoru
$K$	Koeficient kompenzace
$K_P$	Stupeň kompenzace
$l_v$	Délka vodiče
$L_K$	Indukčnost vedení
$L_1$	Označení fáze číslo 1
$L_2$	Označení fáze číslo 2
$L_3$	Označení fáze číslo 3
$m$	Střední výška vodičů
$M$	Vzájemná indukčnost
MN	Malé napětí

MKP	Metalizované kondenzátory polypropylénové
MKV	Metalizované kondenzátory s oboustranně pokoveným papírem
N	Počet stupňů kompenzace
NN	Nízké napětí
Obr.	Obrázek
P	Činný výkon
$P_Z$	Ztráty na vedení
$Q_C$	Kapacitní jalový výkon
$Q_L$	Induktivní jalový výkon
$Q_K$	Kompenzační jalový výkon
Q	Jalový výkon
$Q_{C1}$	Jalový výkon jednoho kompenzačního stupně
$Q_v$	Náboj vodiče
$Q_Z$	Tepelné ztráty
r	Poloměr vodiče
$R_K$	Činný odpor vedení
$R_{20}$	Odpor při teplotě 20°C
S	Zdánlivý výkon
$S_K$	Kompenzační zdánlivý výkon
t	Čas
$\tan \varphi$	Tangenta úhlu $\varphi$
TRAFO	Transformátor
UVN	Ultra vysoké napětí
UCPTE	Unie pro koordinaci přenosu elektrické energie
$U_{1K}$	Vstupní napětí po kompenzaci
$U_1$	Vstupní napětí
$U_2$	Výstupní napětí
$U_f$	Fázové napětí
$U_K$	Kompenzační napětí
$U_S$	Sdružené napětí
VN	Vysoké napětí
VVN	Velmi vysoké napětí



$W$	Vykonaná práce
$X_C$	kapacitní reaktance
$X_K$	Induktivní reaktance
$Y_K$	Příčná admitance
$Z_K$	Podélná impedance
ZVN	Zvláště vysoké napětí
$\alpha$	Teplotní součinitel odporu
$\alpha_{Cu}$	Teplotní součinitel odporu pro měděný vodič
$\alpha_{Al}$	Teplotní součinitel odporu pro hliníkový vodič
$\varepsilon$	Permitivita
$\rho$	Měrný odpor vodiče při teplotě 20°C
$\rho_{vz}$	Vzdálenost od vodiče, ve kterém se předpokládá nulový potenciál
$\rho_0$	Vzdálenost od vodiče
$\rho_{Al}$	Měrný odpor hliníkového vodiče
$\rho_{Cu}$	Měrný odpor měděného vodiče
$\varphi$	Fázový posuv před kompenzací
$\varphi_K$	Fázový posuv po kompenzaci
$\omega$	Úhlová rychlost
$\Delta\theta$	Rozdíl teplot ve stupních Celsia

Pokud v tomto seznamu nejsou některé zkratky uvedeny, jsou vysvětleny přímo v textu.

## Obsah

<b>Úvod .....</b>	<b>1</b>
<b>1. Rozdělení elektrických sítí.....</b>	<b>2</b>
1.1. Rozdělení z hlediska hladiny napětí.....	2
1.2. Rozdělení podle druhů sítí .....	3
1.2.1. Přenosové sítě.....	3
1.2.2. Distribuční sítě .....	5
1.2.3. Průmyslové sítě .....	6
1.3. Provozní spolehlivost .....	8
1.4. Rozdělení z hlediska parametrů .....	9
1.4.1. Činný odpor.....	10
1.4.2. Indukčnost vedení .....	11
1.4.3. Kapacita vedení .....	12
1.4.4. Svodová vodivost .....	13
<b>2. Elektrický výkon .....</b>	<b>14</b>
2.1. Zdánlivý výkon .....	15
2.2. Činný výkon .....	15
2.3. Jalový výkon .....	15
<b>3. Kompenzace účinníku .....</b>	<b>16</b>
3.1. Důvody kompenzace účinníku .....	17
3.2. Dodržování účinníku .....	19
3.3. Základní rozdělení kompenzace.....	21
3.3.1. Sériová kompenzace účinníku.....	21
3.3.2. Paralelní kompenzace účinníku.....	21
<b>4. Kompenzační zařízení.....</b>	<b>23</b>
4.1. Zařazení kompenzačního zařízení.....	23
4.1.1. Individuální kompenzace .....	23
4.1.2. Skupinová kompenzace.....	24
4.1.3. Centrální kompenzace .....	25
4.2. Statické kompenzátory .....	25
4.2.1. Kompenzační kondenzátory pro NN.....	26
4.2.2. Kompenzační kondenzátory pro VN.....	27
4.3. Rotační kompenzátory .....	27

<b>5. Způsoby řízení kompenzace .....</b>	<b>29</b>
5.1. Stupňovité řízení .....	30
5.1.1. Kontaktní řízení.....	31
5.1.2. Bezkontaktní řízení .....	31
5.2. Plynulé řízení .....	31
5.2.1. Pasivní s dekompenzačními členy.....	31
5.2.2. Aktivní .....	32
5.3. Kombinované řízení .....	32
<b>6. Příklad výpočtu potřebného kompenzačního výkonu .....</b>	<b>33</b>
6.1. Zadání příkladu .....	33
6.2. Řešení.....	33
6.2.1. Stav před kompenzací .....	33
6.2.2. Stav po kompenzací .....	34
<b>7. Návrh kompenzace pro průmyslového odběratele.....</b>	<b>37</b>
7.1. Výsledky měření .....	37
7.2. Zpracování naměřených hodnot .....	37
7.3. Návrh kompenzace.....	39
<b>Závěr .....</b>	<b>41</b>
<b>Literatura.....</b>	<b>42</b>
<b>Seznam obrázků .....</b>	<b>43</b>
<b>Seznam tabulek .....</b>	<b>44</b>
<b>Seznam grafů.....</b>	<b>45</b>
<b>Seznam příloh.....</b>	<b>46</b>

## Úvod

V úvodních kapitolách této práce jsou uvedeny a vysvětleny základní pojmy z oblasti kompenzace jalového výkonu, základní rozdělení kompenzace a principy kompenzace. Jsou shrnuty požadavky a nároky na kompenzaci jalového výkonu s uvedením, kdo má povinnost dodržovat požadovanou hodnotu účinníku a jaké jsou sankce při jeho nedodržení. Jedna z kapitol je věnována popisu distribučních a průmyslových sítí. U průmyslových sítí je uvedeno jejich dělení podle rozvodu. Další kapitola se věnuje samotnému jalovému výkonu, ale také výkonu činnému a sdruženému.

Následující kapitoly se věnují podrobnějšímu popisu a rozdělení kompenzace a kompenzačních prostředků. Jsou popsány nejvíce využívané způsoby kompenzace. Uvedena je také sériová kompenzace, ale hlavně paralelní kompenzace, která je využívána v praxi. Velká část práce je věnována kompenzačním zařízením používaných při kompenzaci jalového výkonu. Pozornost je věnována zejména rotačním kompenzátorům a kompenzačním kondenzátorům. V kapitolách jsou uvedeny vzorce související s danou problematikou.

V předposlední kapitole je uveden výpočet potřebného kompenzačního výkonu pro dosažení požadovaného účinníku odběru. V příkladu je spousta výpočtů, které zobrazují vliv kompenzace na parametry sítě.

Poslední kapitola se věnuje praktickému řešení kompenzace pro daného průmyslového odběratele.

## 1. Rozdělení elektrických sítí

Elektrická síť je soubor vzájemně propojených jednotlivých elektrických stanic a vedení určených pro přenos a rozvod elektrické energie. První sítě byly vybudovány pro přenos stejnosměrného napětí, ale pro přenos elektrické energie na větší vzdálenosti byly nevhodné z důvodu velkých ztrát. Díky tomu se po celém světě začaly pro běžný přenos elektrické energie využívat střídavé sítě. Stejnosměrných sítí se užívá při experimentech přenosu extrémně vysokého napětí nebo v malých místních sítích. Nejužívanější střídavé sítě jsou třífázové sítě, jelikož se v praxi ukázaly jako nejvhodnější.

### 1.1. Rozdělení z hlediska hladiny napětí

V České republice se rozlišují distribuční a přenosové sítě. Používá se 6 hladin napětí a to hladina malého (MN), nízkého (NN), vysokého (VN), velmi vysokého (VVN), zvláště vysokého napětí (ZVN) a ultra vysokého napětí (UVN).

#### Napět'ové hladiny:

MN - malé napětí do 50 V

NN - nízké napětí do 1 000 V

400/230 V

5 00 V - využití v průmyslu

1 000 V - využití v dolech pro důlní stroje

VN - vysoké napětí do 52 kV

3 kV - v dnešní době se téměř nepoužívá

6 kV - využití v průmyslu

10 kV

22 kV - nejpoužívanější (malé ztráty)

35 kV

VVN - velmi vysoké napětí do 300 kV 110 kV

220 kV

ZVN - zvláště vysoké napětí do 800 kV

UVN - ultra vysoké napětí nad 800 kV

## 1.2. Rozdělení podle druhů sítí

### 1.2.1. Přenosové sítě

Slouží k dálkovému přenosu elektrické energie o velmi vysoké hladině napětí. Jejich součástmi jsou distribuční sítě, provedené venkovními a kabelovými vedeními. Kromě hlavního zařízení, které slouží bezprostředně pro výrobu, přenos a spotřebu elektrické energie, jsou součástí elektrizační soustavy i pomocná zařízení pro zajištění řádného, bezpečného a spolehlivého chodu hlavních zařízení. Důležitými pomocnými zařízeními jsou zařízení pro přenos informací a pro řízení elektrizační soustavy. Trasy propojují jednotlivé zdroje a transformační stanice za účelem snazšího řízení přenosu elektrické energie v závislosti na okamžité spotřebě elektrické energie v daných oblastech a také v případě poruchy na některé z částí elektrické sítě.

Optimální výkon je přenášen vedením tehdy, jestliže se ztráty indukční a kapacitní vyrovnávají, tj. když:

$$\omega \cdot L_v \cdot I^2 = \omega \cdot C_v \cdot U_f^2 \quad (1.1)$$

kde

$\omega$	úhlová rychlost [rad/s]
$L_v$	indukčnost vedení [H]
$C_v$	kapacita vedení [F]
$I$	proud procházející vedením [A]
$U_f$	fázové napětí [V]

Vedení se tedy samo kompenzuje. Za této podmínky se vedením přenáší přirozený výkon vedení.

Od roku 1995 je naše přenosová soustava propojena se západoevropskou soustavou UCPTE (Unie pro koordinaci přenosu elektřiny) a od 60. let minulého století se soustavami tehdejších socialistických zemí.

V dnešní době je v České republice přes 3400 km linek o napětí 400 kV a asi 2000 km linek s napětím 220 kV. Přenosovou soustavu České republiky vlastní společnost ČEPS, a.s. Soustavu tvoří 37 přenosových zařízení umístěných ve 30 transformovnách. Celkový instalovaný výkon transformátorů je přibližně 16 800 MVA a kompenzačních tlumivek 1 450 MVar.



Obr. 1: Přenosová síť 400 kV a 220 kV v České republice [7]

Při dálkovém přenosu napětí se využívá co nejvyššího napětí a to z důvodu snížení ztrát. Je tedy ekonomičtější využívat k dálkovému přenosu co nejvyšší napětí, aby vedením procházel co nejmenší proud, a tím nedocházelo k velkým ztrátám. Vodič klade procházejícímu elektrickému proudu odpor  $R$  a tím se vodič zahřívá a část elektrické energie se mění na teplo. Velikost tepelných ztrát pak závisí na odporu vodiče a na druhé mocnině procházejícího proudu. To znamená, že dvakrát větší proud způsobuje čtyřikrát větší ztráty. Zde platí vztah:

$$Q_z = R_v \cdot I^2 \dots [\text{var}; \Omega, A] \quad (1.2)$$

kde

- $Q_z$       tepelné ztráty vedení  
 $R_v$       odpor vedení  
 $I$         proud procházející vedením

Pro výpočet elektrického výkonu platí vztah:

$$P = U \cdot I \dots [W; V, A] \quad (1.3)$$

kde

- $U$         napětí na vedení  
 $I$         proud procházející vedením

**Př.:** Přenáší-li se výkon 10 kW s použitím malého napětí 10 V, pak vodičem bude procházet proud 1000 A. Použije-li se pro přenos výkonu 10 kW napětí 10 kV, pak vodičem bude procházet 1 A a tím klesnou tepelné ztráty milionkrát.

$$P = U \cdot I$$

$$P = U \cdot I$$

$$I = \frac{P}{U} = \frac{10000}{10} = 1000 \text{ A}$$

$$I = \frac{P}{U} = \frac{10000}{10000} = 1 \text{ A}$$

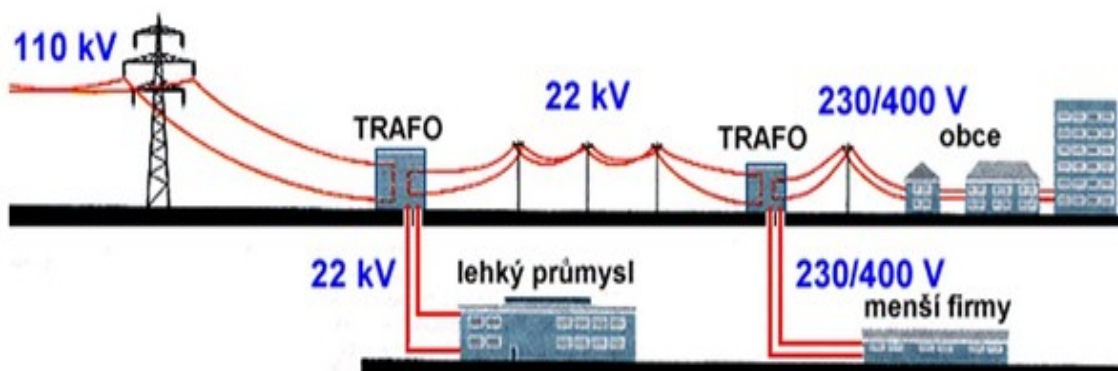
$$Q = R \cdot I^2 = 1000000$$

$$Q = R \cdot I^2 = 1$$

Velikost napětí přenosové soustavy však nesmí být větší jak 400 kV a to z důvodu výskytu elektrického pole kolem vodičů. Při vyšších napětích je toto pole tak silné, že vzniká koróna. Ve vlhkém počasí koróna způsobuje sršení, které se projevuje viditelně i akusticky a výrazně zvyšuje ztráty. Vyšší napětí tedy vyžaduje technické úpravy, jako je třeba použití odolnějších izolátorů.

### 1.2.2. Distribuční síť

Velmi vysoké napětí z přenosové sítě se v transformační stanici transformuje na napětí vysoké. Část elektrické energie se pak přivádí do velkých podniků, průmyslových oblastí a měnících zajišťujících napájení železničních tratí. Zbytek elektrické energie putuje k dalším spotřebitelům, jako je lehký průmysl, města a obce. Zde se transformuje na napětí 22 kV. K závěrečné transformaci na nízké napětí 400 V/230 V pak dochází v samotných podnicích, městech a obcích.



Obr. 2: Distribuční síť [7]



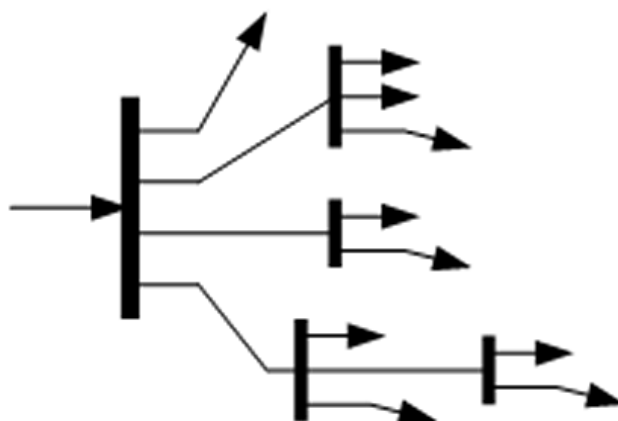
### 1.2.3. Průmyslové sítě

V průmyslových rozvodech se zřizuje jedna nebo více transformoven napětí a rozvoden, rozvaděčů a rozvodnic napájených z jedné nebo více vstupních stanic. Transformátory je doporučeno umístit vždy co nejblíže místu spotřeby. Rozvod ke spotřebičům, podružným rozvodnicím, rozvaděčům a rozvodnám se provádí převážně jako rozvod paprskový, průběžný, okružní, mřížový nebo kombinací jmenovaných možností.

#### Rozdělení průmyslových sítí:

- Paprskové sítě

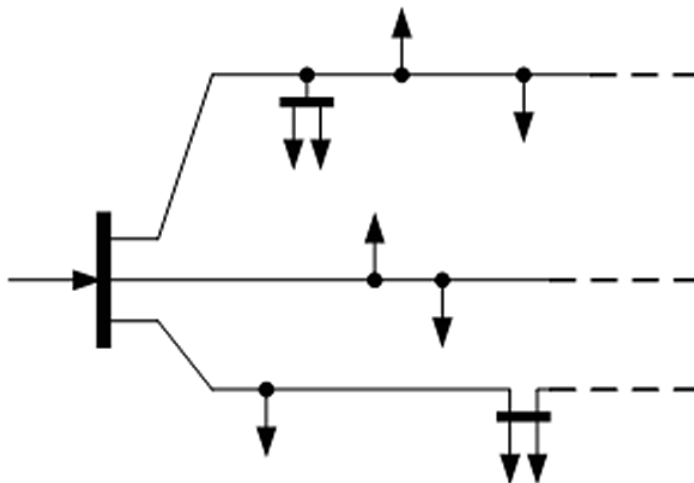
Paprskový rozvod je velice jednoduchý a přehledný. Každý rozvaděč a spotřebič má nejčastěji své vlastní vedení. Používá se v distribučních rozvodech NN a v menších průmyslových závodech, kde nejsou spotřebiče 1. stupně důležitosti elektrické dodávky. Nevýhodou tohoto druhu rozvodu je menší spolehlivost.



Obr. 3: Paprsková síť [14]

- Průběžný rozvod

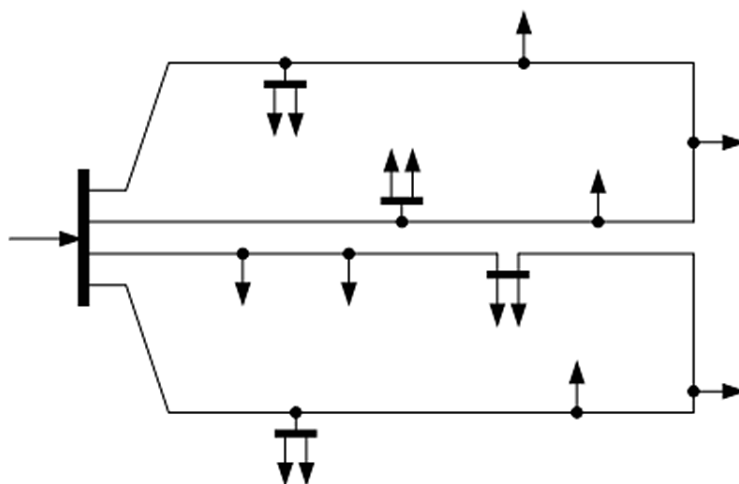
Průběžný rozvod je také jednoduchý a přehledný stejně jako paprskový. Vedení prochází průběžně od jednoho rozvaděče nebo spotřebiče. Průběžný rozvod je vhodný pro napájení větších a rozlehlějších průmyslových hal s menšími spotřebiči. Spolehlivost při provozu je stejná jako u paprskových sítí.



Obr. 4: Průběžný rozvod [14]

- Okružní rozvod

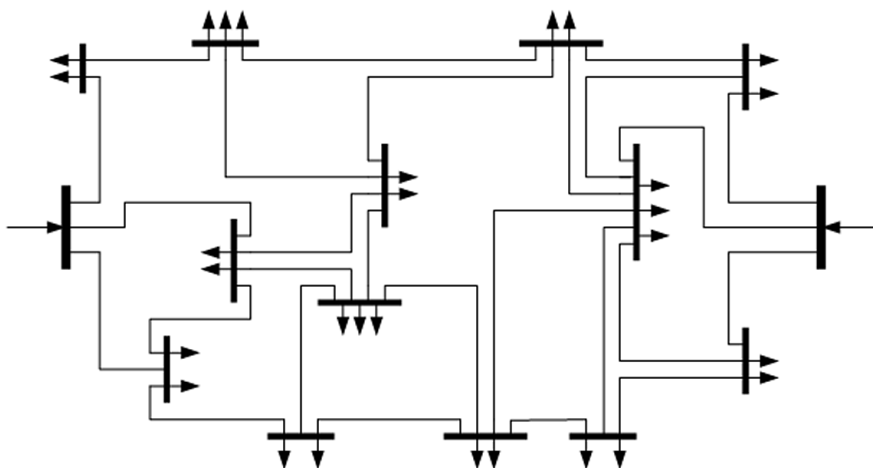
Okružní rozvod (smyčkový) je proveden jako uzavřený okruh, který umožňuje napájení jednotlivých paprskových rozvodů. Při poruše napájení nebo rozvaděče umožňuje napájet rozvaděč a spotřebiče z druhé strany. Tím se zajistí lepší dostupnost elektrické energie. Používá se pro náročné spotřebiče a ve velkých průmyslových závodech.



Obr. 5: Okružní rozvod [14]

- Mřížový rozvod

Mřížový rozvod vznikne vzájemným propojením nejlépe všech rozvaděčů. Vznikne rozvod, ve kterém jsou jednotlivé rozvaděče napájeny ze dvou stran. Poruchy rozvaděčů a vedení se tak omezí na menší úsek, a tím neomezí chod celé sítě. Při poruše se pak provede přepnutí na napájení z rozvodu bez poruchy. Mřížový rozvod je stabilní a hodí se tak pro větší průmyslové objekty.



Obr. 6: Mřížový rozvod [14]

### 1.3. Provozní spolehlivost

**1. stupeň důležitosti** - jsou to takové spotřebiče nebo skupiny spotřebičů, kde při výpadku napájecího napětí může dojít k ohrožení zdraví nebo velké ekonomické ztráty. Tyto spotřebiče vyžadují rezervní zdroj nezávislý na pracovním zdroji, který pokryje důležitou spotřebu. Nezávislým zdrojem může být UPS nebo záložní elektrocentrála.

Do této kategorie patří zdravotnická zařízení, zařízení pro přenos a zpracování dat, požární bezpečnost a další.

**2. stupeň důležitosti** - omezením nebo zastavením chodu nesmí dojít k narušení technologických procesů, ani k ohrožení zdraví nebo životů lidí. U těchto spotřebičů se musí zajistit obnovení dodávky elektrické energie, ale nejsou vyžadovány speciální opatření pro náhradní napájení nebo záložní zdroj.

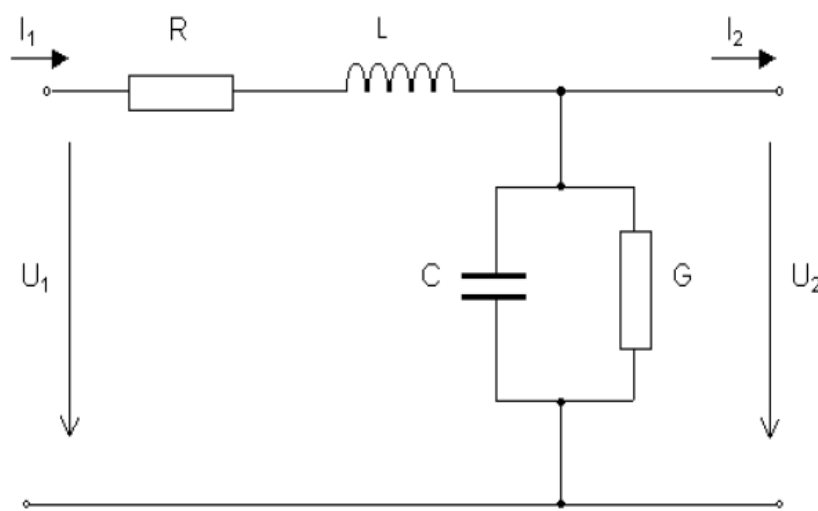
Do této kategorie patří dílny s obráběcími stroji a další průmyslové provozovny.

**3. stupeň důležitosti** - do této skupiny patří takoví odběratelé, u kterých není zapotřebí zajišťovat zvláštní opatření pro obnovu elektrické energie.

Patří sem úřady, školy a obydlí.

### 1.4. Rozdělení z hlediska parametrů

Vzhledem k délce vedení je nutné kromě odporu vedení  $R$  také uvažovat indukčnost vedení  $L$ , kapacitu vedení  $C$ . Svodový odpor  $G$  se většinou zanedbává. Tyto jmenované parametry jsou rozloženy po celé délce vedení. Tyto parametry rozhodují o volbě a dimenzování vedení. Příčné prvky způsobují úbytky proudu a podélné úbytky napětí.



Obr. 7: Náhradní schéma vedení [12]

Podélnou impedanci tvoří činný odpor a indukčnost vedení. Příčnou admitanci tvoří kapacita vedení společně se svodem (svodový odpor).

V praxi se využívá pro výpočet soustředěných parametrů zjednodušeného náhradního schématu vedení. Řešení pomocí rovnoměrně rozložených parametrů je značně zdoluhavé a složité. Náhradní obvody, články jsou obvykle nazývány podle písmene připomínajícího jejich tvar. Nejčastěji používané články jsou  $\pi$  a T. Pro výpočet se využívá Blondelových konstant.

**Výpočet impedance:**

$$\hat{Z}_K = R_K + j \cdot X_K \dots [\Omega \cdot km^{-1}; \Omega \cdot km^{-1}, \Omega \cdot km^{-1}] \quad (1.4)$$

kde

$Z_K$	podélná impedance
$R_K$	činný odpor vedení
$X_K$	induktivní reaktance

**Výpočet admitance:**

$$\hat{Y}_K = G_K + j \cdot B_K \dots [S \cdot km^{-1}; S \cdot km^{-1}, S \cdot km^{-1}] \quad (1.5)$$

kde

$Y_K$	příčná admitance
$G_K$	svodová vodivost
$B_K$	kapacitní susceptance

**1.4.1. Činný odpor**

Je závislý na vodivém materiálu vedení a vyjadřuje schopnost vedení klást odpor. Tvoří část podélné impedance. Vypočítá se dle vztahu:

$$R_K = \rho \cdot \frac{l_v}{S} \dots [\Omega; \Omega \cdot mm^2 \cdot m^{-1}, m, mm^2] \quad (1.6)$$

kde

$\rho$	měrný odpor vodiče při teplotě 20°C
$l_v$	délka vodiče
$S$	průřez vodiče

Měrný odpor pro měděné vodiče je  $\rho_{Cu}=0,0178 \Omega \cdot mm^2 \cdot m^{-1}$  a pro hliníkové vodiče je  $\rho_{Al}=0,0285 \Omega \cdot mm^2 \cdot m^{-1}$ .

Odpor roste s teplotou a to podle vztahu:

$$R_g = R_{20} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta\theta) \dots [\Omega; \Omega, K^{-1}, K] \quad (1.7)$$

kde

$R_{20}$	odpor při teplotě 20°C
$\alpha$	teplotní součinitel odporu
$\Delta\theta$	rozdíl teplot

Teplotní součinitel odporu pro měděné vodiče je  $\alpha_{Cu}=3,93 \cdot 10^{-3} K^{-1}$  a pro hliníkové vodiče je  $\alpha_{Al}=4 \cdot 10^{-3} K^{-1}$ .

U střídavého proudu se projevuje frekvenční závislost vlivem skinefektu (povrchového jevu). Při frekvenci 50 Hz lze skinefekt zanedbat. Zanedbat jej nelze u plných vodičů na velké proudy, které se vyskytují například v rozvodnách a také při přechodných jevech.

Skinefekt se projevuje vytlačováním proudu k povrchu vodiče vlivem magnetického pole uvnitř vodiče. Činný odpor se pak jeví mnohokrát větší u střídavého proudu než u proudu stejnosměrného.

#### 1.4.2. Indukčnost vedení

Kolem vodiče se vytváří elektromagnetické pole, které působí na vodiče okolní i na vodič samotný. Rozlišujeme tedy indukčnost vlastní a vzájemnou. Tvoří část podélné impedance.

**Vlastní indukčnost:**

$$L_K = 0,46 \cdot \log \frac{2 \cdot d}{r} - 0,15 \dots \left[ \frac{mH}{km}, m, m \right] \quad (1.8)$$

kde

d            vzdálenost mezi vodiči

r            poloměr vodiče

**Vzájemná indukčnost:**

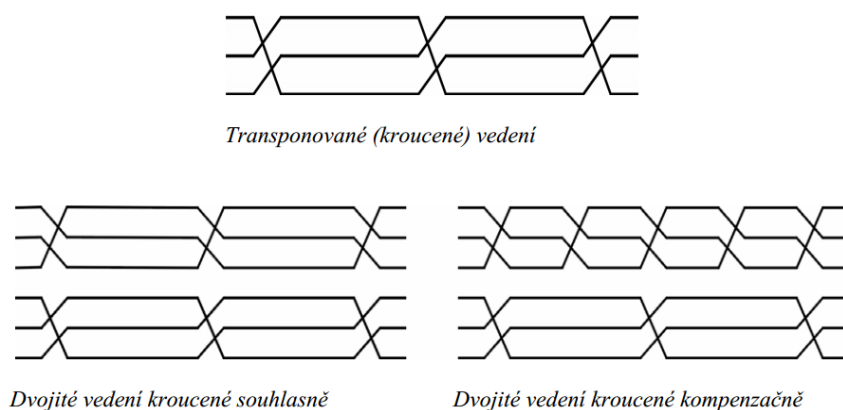
$$M = 0,46 \cdot \log \frac{2 \cdot l}{a} - 0,2 \dots \left[ \frac{mH}{km}; m, m \right] \quad (1.9)$$

kde

l            délka vodiče

a            vzdálenost mezi vodiči

Aby nedocházelo k nesouměrnosti napětí na konci třífázových vedení, provádí se na vedení VN a VVN v určitých vzdálenostech tzv. zákrut (Obr. 8). Znamená to vystřídání pozic vodičů. Dvojitě vedení může být krouceno souhlasně i kompenzačně. U kompenzačního kroucení má vedení různý počet zákrutů, tím dojde k vystřídání vzájemných vzdáleností linek.



Obr. 8: Kroucení vedení z důvodu stejných parametrů nesouměrných 3 fázových sítí [12]

### 1.4.3. Kapacita vedení

Kolem vodiče se vytváří elektrické pole působící na samotný vodič a na vodiče okolní. Tvoří část příčné admitance. Vypočítá se dle následujícího vztahu:

$$C_K = \frac{0,0242}{\log \frac{2 \cdot d_s \cdot m}{r \cdot D_s}} \dots \left[ \frac{mF}{km}; m, m \right] \quad (1.10)$$

kde

$D_s$	střední vzdálenost vodičů při zrcadlení
$d_s$	střední vzdálenost vodičů
$m$	střední výška vodičů
$r$	poloměr vedení

### Potenciál vedení

$$U = \frac{Q_v}{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon} \cdot \ln \frac{\rho_0}{\rho_{vz}} \dots \left[ V; \frac{C}{m}, \frac{F}{m} \right] \quad (1.11)$$

kde

$Q_v$	náboj vodiče
$\varepsilon$	permitivita
$\rho_{vz}$	vzdálenost od vodiče, ve kterém se předpokládá nulový potenciál
$\rho_0$	vzdálenost od vodiče

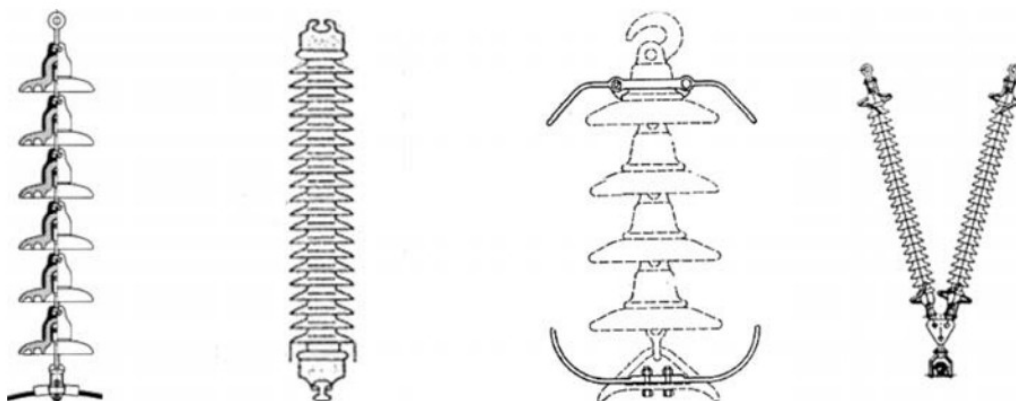
#### 1.4.4. Svodová vodivost

Tvoří část příčné admitance vedení a často se při výpočtech zanedbává. Je způsobena především vodivostí izolátorů a ztrátami korónou. Závisí na kvalitě izolátoru, ale také na provozních a atmosférických podmínkách. Jelikož neexistuje dokonalý izolant, prochází vždy každým izolantem proud. Svodový proud je především povrchový, proto jsou izolátory konstruovány tak, aby jimi svodový proud protékal s obtížemi. Svod způsobuje činné ztráty na vedení, které se vypočítají podle následujícího vztahu:

$$\Delta P_z = 3 \cdot U_f \cdot G_K \dots \left[ \frac{W}{km}; V, \frac{S}{km} \right] \quad (1.12)$$

kde

$U_f$	fázové napětí
$G_K$	svodová vodivost



Obr. 9: Vybrané druhy izolantů [12]

**Koróna** je doutnavý výboj světle fialové barvy doprovázený zvukovými efekty. Vznikne, pokud překročí intenzita elektrického pole elektrickou pevnost vzduchu. Napětí, při němž koróna vzniká, se nazývá kritické napětí. Jeho velikost je závislá na atmosférických podmínkách, povrchu a poloměru vodičů a jejich vzdálenosti. Mimo činných ztrát způsobuje koróna rušení telekomunikačních zařízení. Zmenšení ztrát korónou můžeme provést použitím svazkových vodičů. [2] [3] [4] [7] [12] [14]



## 2. Elektrický výkon

Elektrický výkon je fyzikální veličina, která vyjadřuje vykonanou elektrickou práci za jednotku času.

$$P = \frac{W}{t} \dots [W; J, s] \quad (2.1)$$

kde

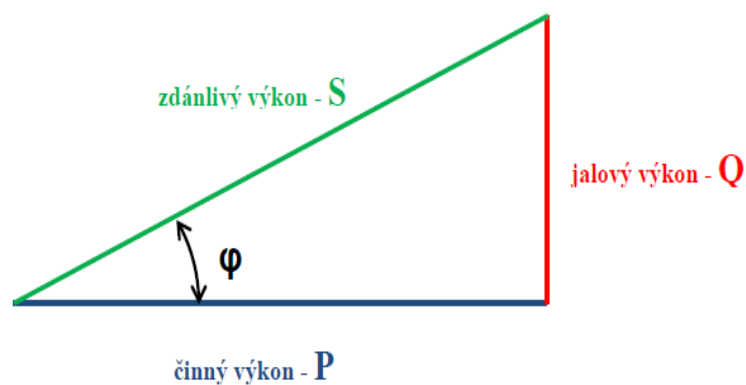
W	vykonaná práce
t	čas

Elektrický výkon střídavého proudu a napětí je dán vztahem:

$$\begin{aligned} \hat{S} &= P + j \cdot Q \\ \hat{S} &= U \cdot I \cdot \cos \varphi + j \cdot U \cdot I \cdot \sin \varphi \end{aligned} \quad (2.2)$$

kde

S	zdánlivý výkon
P	činný výkon
Q	jalový výkon
$\varphi$	fázový posuv



Obr. 10: Trojúhelník výkonu [14]

### 2.1. Zdánlivý výkon

Zdánlivý elektrický výkon se ve střídavých obvodech skládá ze dvou složek. Ze složky činného a jalového výkonu. Jedná se o komplexní číslo. Je udáván v jednotkách VA (voltampéry). Vypočítá se podle výše uvedeného vztahu (vzorec 14).

### 2.2. Činný výkon

Činný elektrický výkon nazývaný jako užitečný výkon je reálná složka zdánlivého výkonu. Činný výkon je výkon, který se nevratně přemění na jinou formu energie. A to na energii mechanickou (např.: roztočí poháněný mechanismus), světelnou (rozsvítí žárovku) a tepelnou (ohřev topné spirály). Jeho velikost se udává ve wattech W.

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi \dots [W; V, A, -] \quad (2.3)$$

kde

U	elektrické napětí
I	elektrický proud
$\varphi$	fázový posuv

### 2.3. Jalový výkon

Jalový elektrický výkon je imaginární složka zdánlivého výkonu. Tento výkon spotřebiče potřebují k vytvoření magnetického pole, proto je tato složka nepostradatelná pro většinu spotřebičů. Největší část elektrických spotřebičů je induktivního charakteru, protože mají vinutí. Bez jalového výkonu by stěží fungovaly asynchronní motory, indukční pece, zářivky nebo transformátory. Jalový výkon je všem těmto spotřebičům dodáván ze sítě. Poté je vrácen zpět do elektrické sítě, a tak koluje mezi spotřebičem a zdrojem, a nespotřebovává se. Jalový výkon zatěžuje generátory, transformátory a přenosová vedení. Jelikož tato část výkonu je nežádoucí a způsobuje ztráty, provádí se jeho kompenzace. [7] [14]

$$Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi \dots [\text{var}; V, A, -] \quad (2.4)$$

kde

U	elektrické napětí
I	elektrický proud
$\varphi$	fázový posuv

### 3. Kompenzace účinníku

Všemi zařízeními a spotřebiči v elektrizační soustavě (např.: elektrická vedení, transformátory, jističí přístroje atd.) prochází společně s činnou složkou proudu také složka jalová. Tato zařízení tedy musí být dimenzována na velikost zdánlivého proudu, který je vektorovým součtem činné a jalové složky.

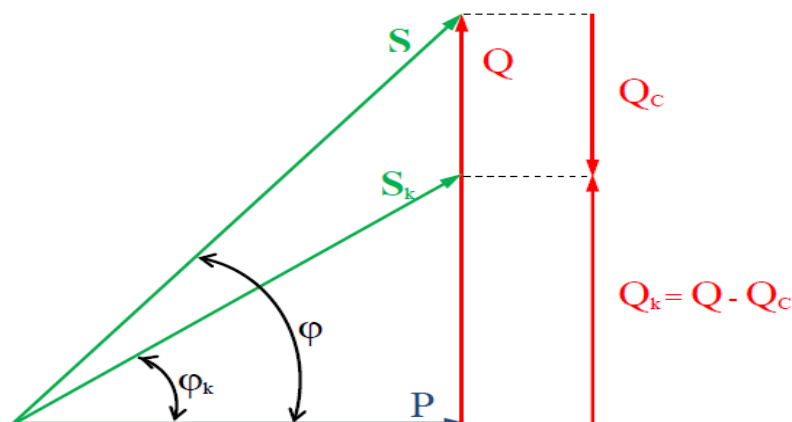
$$I = \sqrt{I_e^2 + I_j^2} \dots [A] \dots [A; A, A] \quad (3.1)$$

kde

$I_e$	činná složka proudu
$I_j$	jalová složka proudu

Pokud je proud větší, jsou větší i náklady na provoz a pořízení. Dochází také ke zhoršení technických parametrů daných zařízení. Pokud chceme odebrat stále stejný zdánlivý výkon, pak velikost činné složky upravovat nemůžeme. Můžeme ale upravit jalovou složku odebíraného zdánlivého výkonu. Je tedy zapotřebí snižovat jalový proud, a tím jalový výkon odebírat ze sítě.

Většina spotřebičů elektrické energie je charakteru induktivního a odebírají tak ze sítě jalový výkon induktivního charakteru. Induktivní jalový výkon spotřebič potřebuje pro svůj chod, tuto složku výkonu však také vrací zpět do sítě. Snížení jalové složky výkonu se dosáhne paralelním připojením kondenzátoru ke spotřebiči. Tak jalový výkon cestuje mezi spotřebičem a kondenzátorem a nejde zpět do sítě. Jalový výkon je dvojího druhu a to induktivní jalový výkon a kapacitní jalový výkon. Induktivní jalový výkon  $Q_L$  vzniká na vinutí neboli indukčnostech. Kapacitní jalový výkon  $Q_K$  vzniká na elektrodách kondenzátoru. Pro snížení odběru jalového výkonu musíme dodat výkon opačného charakteru, který je fázově posunutý o  $180^\circ$ . Tímto výkonem je kapacitní jalový výkon  $Q_K$ . Odebíraný induktivní výkon je tedy možno snížit za pomoci kondenzátorů. Velikost činného výkonu se nemění, klesá odebíraný zdánlivý výkon, a tím klesá i námi odebíraný proud.



Obr. 11: Trojúhelník výkonu před a po kompenzaci [14]

### 3.1. Důvody kompenzace účinníku

Kompenzaci musí provádět každý odběratel elektrické energie, aby nebyl postižen přírážkou k ceně elektrické energie dodavatelem. Cílem kompenzace je minimalizovat jalovou složku proudu, a tím snížit ztráty. Kompenzace patří mezi základní prostředky pro snížení ztrát.

**Mezi hlavní důvody kompenzace patří:**

- Snížení pořizovacích nákladů na elektrická zařízení. Tím je možno dimenzovat stroje, přístroje a vedení na menší proudy. Tím klesá jejich cena.
- Zlepšení zkratových poměrů v síti elektrického vedení.
- Zmenšení úbytku napětí na vedení. Pokud se sníží po kompenzaci proud, sníží se i úbytky oproti nekompenzovanému odběru.

$$\Delta \hat{U} = \hat{Z} \cdot \hat{I} \dots [V; \Omega, A] \quad (3.2)$$

kde

Z            impedance vedení

I            elektrický proud procházející vedením

- Větší zatížitelnost. Při větším účinníku mohou transformátory dodávat větší činný výkon, a tím mohou být efektivněji využity.
- Zmenšení ztrát výkonu na vedení. Obě složky zdánlivého proudu se podílejí na ztrátách. Při snížení jalového proudu dojde k poklesu celkového proudu, a tím i ke zmenšení ztrát. Pro třífázové vedení platí:

$$\Delta P = 3 \cdot R \cdot I^2 = 3 \cdot (I_{\varepsilon}^2 + I_j^2) \dots [W; \Omega, A] \quad (3.3)$$

**Ztráty před kompenzací se vypočítají dle vztahu:**

$$\Delta P = 3 \cdot R \cdot I^2 = 3 \cdot \frac{R}{U_S^2} \cdot (P^2 + Q^2) \dots [W; \Omega, A] \quad (3.4)$$

**Ztráty po kompenzací se vypočítají dle vztahu:**

$$\Delta P = 3 \cdot \frac{R}{U_S^2} \cdot [P + (Q - Q_C)^2] \dots [W; \Omega, A] \quad (3.5)$$

kde

$U_S$  sdružené napětí

$Q_K$  potřebný kompenzační výkon

**Stanovení kompenzačního výkonu:**

$$Q_K = U_S^2 \cdot \omega \cdot C = P \cdot (tg \varphi - tg \varphi_K) \dots [\text{var}; V, s^{-1}, F] \quad (3.6)$$

kde

$\varphi$  fázový posuv před kompenzací

$\varphi_K$  fázový posuv po kompenzací

Určení tg  $\varphi$ :

$$tg \varphi = \frac{Q}{P} \dots [-; VA_r, W] \quad (3.7)$$

**Koeficient kompenzace:**

$$K = \frac{tg \varphi_K}{tg \varphi} \dots [-; -, -] \quad (3.8)$$

**Stupeň kompenzace:**

$$K_P = \frac{tg \varphi - tg \varphi_K}{tg \varphi} \dots [-; -, -] \quad (3.9)$$

### 3.2. Dodržování účinníku

Povolená hodnota účinníku je u nás stanovena v rozsahu od 0,95 až 1 a to induktivního charakteru. Při nedodržení bude distributorem elektrické energie účtována přírážka k ceně elektrické energie (Tabulka 1). Výši přírážek určuje každoročně Energetický regulační úřad. Kontrole účinníku podléhají jen průmysloví odběratelé, kteří jsou rozděleni do více skupin dle napěťové hladiny. Odběratel může být také pokutován za nežádoucí dodávku kapacitního jalového výkonu do distribuční sítě. Tato nežádoucí dodávka je způsobena překompenzováním.

**Účinník** je bezrozměrná veličina vyjadřující podíl činného výkonu a zdánlivého výkonu. Udává, jak velkou část zdánlivého výkonu lze přeměnit na užitečnou energii. Účinník je funkce  $\cos \varphi$ , kde  $\varphi$  je úhel fázoru mezi proudem a napětím.

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} \dots [-; W, VA] \quad (3.10)$$

Hodnotu účinníku lze také určit z trojúhelníku proudů, napětí a odporů.

Tabulka 1: Platba za nedodržení požadované hodnoty účinníku [5]

Rozsah tgφ kvarh/kWh	cosφ	Přirážka %	Rozsah tgφ kvarh/kWh	cosφ	Přirážka %
0,311-0,346	0,95	-	1,008-1,034	0,70	37,59
0,347-0,379	0,94	1,12	1,035-1,063	0,69	39,66
0,380-0,410	0,93	2,26	1,064-1,092	0,68	41,80
0,411-0,440	0,92	3,43	1,093-1,123	0,67	43,99
0,441-0,470	0,91	4,63	1,124-1,153	0,66	46,25
0,471-0,498	0,90	5,85	1,154-1,185	0,65	48,58
0,499-0,526	0,89	7,10	1,186-1,216	0,64	50,99
0,527-0,553	0,88	8,37	1,217-1,249	0,63	53,47
0,554-0,580	0,87	9,68	1,250-1,281	0,62	56,03
0,581-0,606	0,86	11,02	1,282-1,316	0,61	58,67
0,607-0,632	0,85	12,38	1,317-1,350	0,60	61,40
0,633-0,659	0,84	13,79	1,351-1,386	0,59	64,23
0,660-0,685	0,83	15,22	1,387-1,423	0,58	67,15
0,686-0,710	0,82	16,69	1,424-1,460	0,57	70,18
0,711-0,736	0,81	18,19	1,461-1,494	0,56	73,31
0,737-0,763	0,80	19,74	1,495-1,532	0,55	76,56
0,764-0,789	0,79	21,32	1,533-1,579	0,54	79,92
0,790-0,815	0,78	22,94	1,580-1,620	0,53	83,42
0,816-0,841	0,77	24,61	1,621-1,663	0,52	87,05
0,842-0,868	0,76	26,32	1,664-1,709	0,51	90,82
0,869-0,895	0,75	28,07	1,710-1,755	0,50	94,70
0,896-0,922	0,74	29,87	Vyšší než 1,755	Nižší než 0,50	100
0,923-0,949	0,73	31,72			
0,950-0,977	0,72	33,63			
0,978-1,007	0,71	35,58			

Hodnota účinníku je od nuly do jedné. Pokud je účinník  $\cos\varphi$  roven 1, znamená to, že celý výkon je činný a jalová složka je nulová. Fázový posun je nulový a jedná se tak o čistě odporovou zátěž. Pokud je však účinník  $\cos\varphi$  roven 0, pak výsledný výkon je jalový. Fázový posun je  $-90^\circ$  a nebo  $+90^\circ$ . Zátěž je pak kapacitní nebo induktivní.

### 3.3. Základní rozdělení kompenzace

Rozlišují se dva základní druhy kompenzace. A to sériová kompenzace a paralelní kompenzace. Ke kompenzaci jalového výkonu se však nejčastěji využívá paralelní kompenzace.

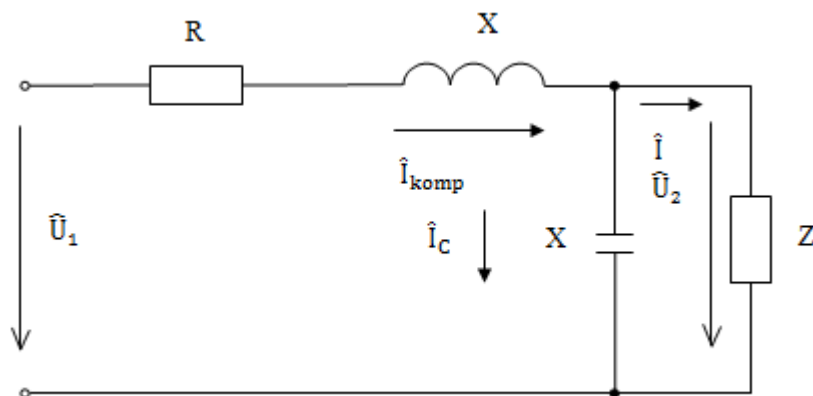
#### 3.3.1. Sériová kompenzace účiníku

Nejčastějším kompenzačním zařízením je kondenzátor. Je možno jej řadit do obvodu sériově, ale také paralelně. Sériové zapojení se užívá ke změně parametrů rozvodné soustavy, a to ke změně podélné impedance vedení. Dochází ke zmenšení indukční reaktance vedení vlivem kapacitní reaktance kondenzátoru. Zapojení kondenzátoru způsobí úbytek napětí na vedení, a tím změni charakteristiku sítě.

#### 3.3.2. Paralelní kompenzace účiníku

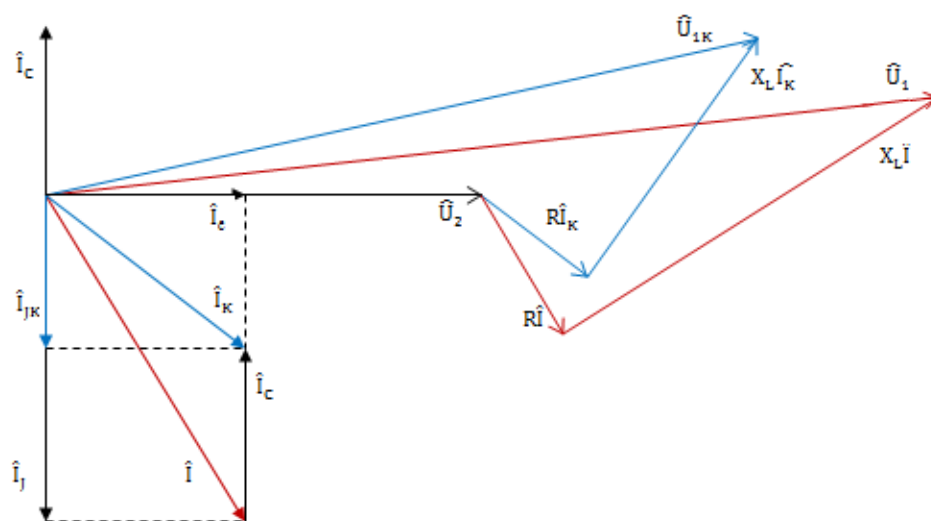
Nejčastěji používané kompenzační zařízení jalového výkonu jsou bezesporu kondenzátory. Kompenzační zařízení se řadí paralelně ke spotřebiči. Paralelní připojení kondenzátoru ke spotřebiči způsobí změnu charakteristiky zatížení sítě (Obr. 12).

Paralelní kompenzace je nejekonomičtější a nejvýhodnější opatření při snižování ztrát u přenosu elektrické energie.



Obr. 12: Schéma paralelní kompenzace [14]





Obr. 13: Fázorový diagram paralelní kompenzace [14]

Ve fázorovém diagramu je červenou barvou znázorněno vedení před kompenzací. To znamená, že červená barva značí fázorový diagram bez zapojení kondenzátoru. Modrá barva vyznačuje vedení po kompenzaci se zapojeným kondenzátorem. Připojením kondenzátoru paralelně ke spotřebiči dojde k poklesu jalové složky odebíraného proudu  $I_J$  (tato složka je induktivního charakteru) na  $I_{JK}$ , vlivem kapacitního jalového proudu kondenzátoru  $I_C$ . Dojde tak k poklesu celkového zdánlivého proudu v síti z hodnoty  $I$  na hodnotu  $I_K$  v poměru účinníku před a po kompenzaci. Pokud se sníží proud, sníží se i úbytek napětí na podélné impedanci vedení a poklesne i napětí  $U_1$  vůči jeho velikosti před kompenzací (Obr. 13). [1] [6] [10] [14]

## 4. Kompenzační zařízení



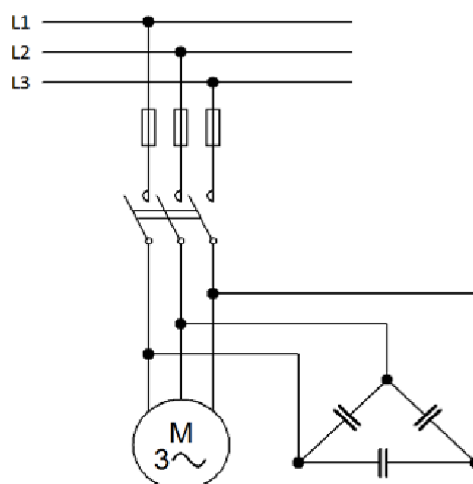
Obr. 14: Kompenzační rozvaděč [9]

### 4.1. Zařazení kompenzačního zařízení

Jeden z prvních kroků při řešení návrhu kompenzace je umístění kompenzačního zařízení. Jsou tři základní možnosti jak zařadit kompenzační zařízení.

#### 4.1.1. Individuální kompenzace

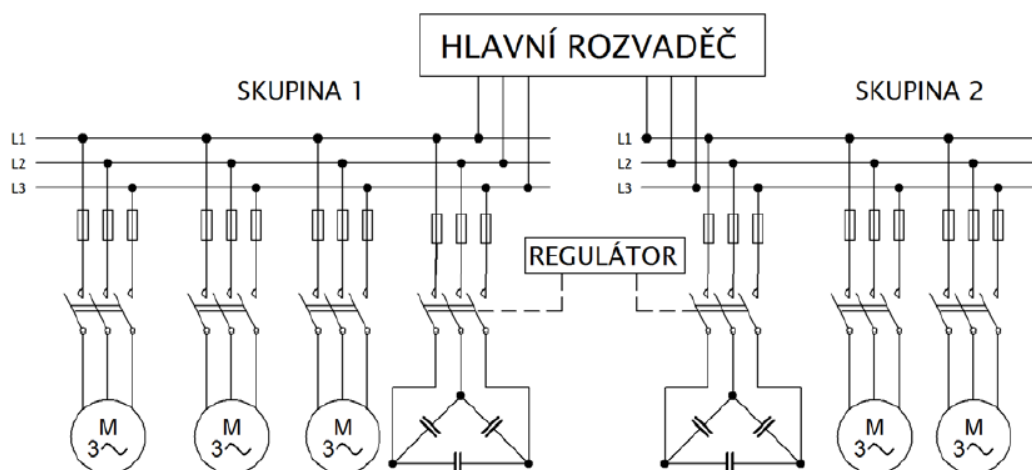
Kompenzační zařízení je připojeno přímo ke spotřebiči (Obr. 15). Dojde tak k odlehčení vedení od zdroje až ke spotřebiči a také ke snížení úbytku napětí na přívodním vedení. Kompenzační zařízení se připojuje zapnutím spotřebiče. Jednotlivá kompenzace se užívá u spotřebičů s velkým výkonem používaných za stálého konstantního zatížení po dlouhou dobu. Jako příklad lze uvést transformátory při chodu naprázdno, asynchronní motory s výkonem desítek až stovek kilowatt nebo sítě zářivkových svítidel. Individuální kompenzace je jednoduchá a spolehlivá. Nevýhodou je velké množství nainstalovaných kompenzačních zařízení (každý spotřebič má své kompenzační zařízení). Z toho vyplývají velké pořizovací ale i provozní náklady. Jednou z dalších nevýhod je návratnost investice do kompenzace při nízkém využití spotřebiče.



Obr. 15: Zapojení kompenzačního zařízení při individuální kompenzaci [13]

#### 4.1.2. Skupinová kompenzace

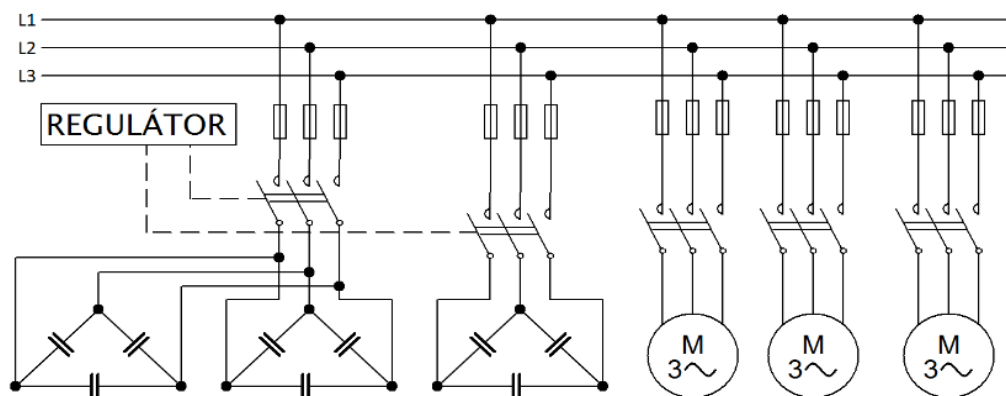
Jedno společné kompenzační zařízení sloužící pro určitou skupinu spotřebičů (Obr 16). Může se využít v podružných rozvaděčích. Kompenzační zařízení se používá pro současně odebíraný výkon. Tento druh kompenzace je vhodný pro spotřebiče provozované krátkodobě a přerušovaně. Připojování a odpojování kompenzačního zařízení se provádí pomocí regulátoru. Skupinová kompenzace umožňuje instalovat menší kompenzační výkon oproti individuální kompenzaci.



Obr. 16: Zapojení kompenzačního zařízení při skupinové kompenzaci [13]

### 4.1.3. Centrální kompenzace

Centrální kompenzace se nejčastěji provádí ve velkých průmyslových podnicích. Kompenzační zařízení je umísťováno v samostatném kompenzačním rozvaděči a může být tvořeno množstvím kondenzátorových baterií (Obr. 17). Pro připojení a odpojení kompenzačního zařízení se musí užít regulace dodávaného kompenzačního výkonu.



Obr. 17: Zapojení kompenzačního zařízení při centrální kompenzaci [13]

### 4.2. Statické kompenzátory

Statické kompenzátory jsou všechna zařízení kromě synchronních strojů. Jsou to zařízení bez rotačních částí, nejčastěji kondenzátory. Mají malé ztráty, a to 0,3 až 0,5% jmenovitého výkonu. Pořizovací náklady jsou menší. Nevýhodou může být změna kompenzačního výkonu, která je v klasickém provedení řešena pouze přepínáním a odpojováním jednotlivých kondenzátorů. Kondenzátory jsou nejčastěji provedeny jako třífázové v zapojení do hvězdy nebo trojúhelníku.

$$Q_K = \frac{U^2}{X_C} = U^2 \cdot \omega \cdot C = U^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C \dots [VAr; V, Hz, F] \quad (4.1)$$

**3 fázové zapojení do hvězdy:**

$$Q_K = \frac{3 \cdot I^2}{\omega \cdot C_Y} = 3 \cdot U^2 \cdot \omega \cdot C_Y \dots [VAr] \quad (4.2)$$

kde

$C_Y$  kapacita kondenzátoru při zapojení do hvězdy

**3 fázové zapojení do trojúhelníku:**

$$Q_K = \frac{I^2}{\omega \cdot C_D} = 3 \cdot U^2 \cdot \omega \cdot C_D \dots [VAr] \quad (4.3)$$

kde

$C_D$  kapacita kondenzátoru při zapojení do trojúhelníku

**4.2.1. Kompenzační kondenzátory pro NN**

Kondenzátory nejčastěji užívají systémy MKP nebo MKV. Oba tyto dielektrické systémy jsou samohojivé. To znamená, že pokovená vrstva se v případě napětového průrazu vypaří. Vznikne izolační plocha, která je velmi malá a nemá žádný vliv na funkci kondenzátoru. Kondenzátorové svitky jsou vloženy nejčastěji do hliníkového pevného obalu, který je opatřen přetlakovým odpojovačem. Kondenzátory MKP se vyrábí z jednostranně pokoveného polypropylenového filmu. Kondenzátory MKV mají elektrody tvořeny oboustranně pokoveným papírem. Dielektrikem je polypropylenová fólie. Jelikož je celý systém impregnován minerálním olejem, je možné MKV kondenzátory použít za vyšší okolní teploty.

Pro vybíjení kondenzátoru slouží vybíjecí rezistory, které by měly být schopny poklesu nebezpečného zbytkového napětí na hodnotu 75 V do doby 3 minut.

Působením tepelného a elektrického přetížení může dojít u kondenzátoru i k výbuchu. Proti tomuto nebezpečí je kondenzátor vybaven přetlakovým odpojovačem. Při zvyšování se tlaku v kondenzátoru dochází k namáhání, které způsobí nadzvednutí víka kondenzátoru a dojde k mechanickému přerušení přívodu ke svitkům.

Kondenzátory jsou určeny pro individuální nebo skupinovou kompenzaci jalového výkonu v sítích s nízkým napětím. Ztráty se pohybují v rozmezí desetin W/kVAr.

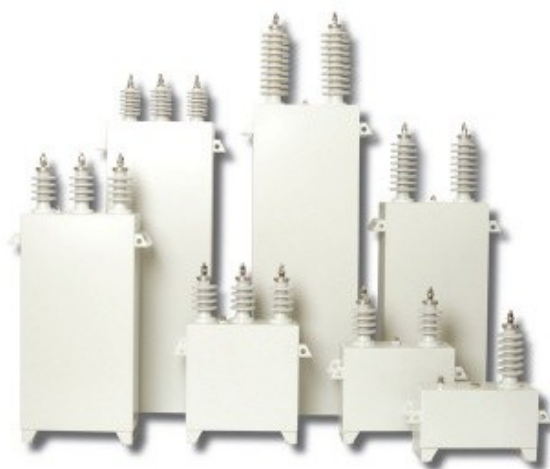


*Obr. 18: Kompenzační kondenzátory pro NN [9]*

#### 4.2.2. Kompenzační kondenzátory pro VN

Dielektrikum je celofóliové a tvoří ho polypropylenová fólie impregnovaná syntetickou kapalinou, která není ekologicky ani zdravotně závadná. Hliníková fólie tvoří elektrody. Ztráty jsou nízké, přibližně stejné jako u kondenzátorů pro NN. Konstrukce je jak jednofázová tak i trojfázová. Kondenzátory pro VN jsou také vybaveny vybíjecími rezistory.

Doby vybití na povolených 75 V činí 10 minut. Kompenzační kondenzátory pro VN jsou také vybaveny tlakovým čidlem.

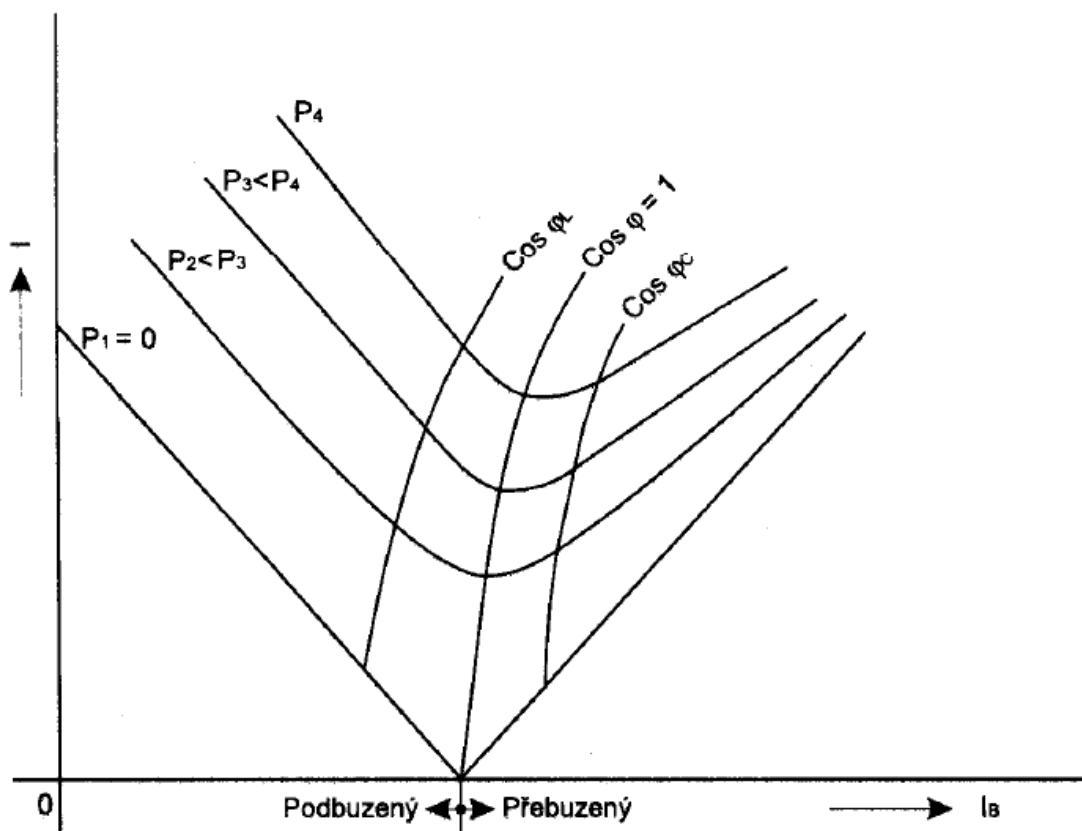


*Obr. 19: Kompenzační kondenzátory pro VN [9]*

#### 4.3. Rotační kompenzátory

Pro kompenzaci jalového výkonu lze také použít synchronních strojů pracujícím v přebuzeném stavu naprázdno. Přebuzený synchronní motor se pak jeví jako kapacitor. Motor tedy neodebírá žádný činný výkon. Synchronní elektrický stroj se odlišuje tím, že magnetizační energie je mu dodávána z budicího vinutí napájeného zdrojem stejnosměrného proudu.

Kompenzační výkon lze měnit plynule a to buzením. To znamená, že změnou velikosti budicího proudu  $I_B$  lze provádět regulaci dodávky nebo spotřeby jalového výkonu (změna účinníku). Změnou budicího proudu se může měnit účinník v oblasti induktivní (podbuzený stav) a také v oblasti kapacitní (přebuzený stav). Synchronní stroj, který má plnit dodávku jalového výkonu, se připojuje paralelně ke kompenzovanému spotřebiči. Na obrázku ukazují V-křivky synchronního motoru závislost satorového proudu na proudu budícím.



Obr. 20: V-křivky synchronního motoru [14]

Kompenzační výkon, který dodává synchronní stroj, se projeví vždy s nějakým zpožděním se změnou budícího proudu. Tím dojde ke krátkodobému překompenzování a také podkompenzování. Díky tomuto zpoždění se synchronní stroje pro kompenzaci užívají tam, kde se často nemění odebíraný jalový výkon. Užívají se tedy tam, kde je stálý a stejný odběr jalového výkonu. Další nevýhodou je častá údržba rotačních částí. Tato údržba bývá finančně náročná. Kladem synchronních kompenzátorů je však možnost vyvedení hřídele, která nám dává mechanickou energii. Mechanická energie se pak může využít mnoha způsoby (kompresory, ventilace). Rotační kompenzátory se nejčastěji využívají ve velkých průmyslových podnicích pro centrální kompenzaci. Připojují se k napěťové hladině 6 kV a 10 kV. Dosahují výkonu od 1 až po 15 MVar. [1] [5] [8] [9] [13] [14]

## 5. Způsoby řízení kompenzace

Řízení kompenzace je nedílná součást návrhu kompenzačního zařízení. Regulátory řídící jalový výkon jsou nejčastěji automatizované přístroje, které řídí kompenzaci na základě aktuální změřené hodnoty napětí a proudu (Obr. 15). Z těchto změřených hodnot pak regulátor pomocí svých výstupů ovládá stykače připínající a odpínající jednotlivé kompenzační části. V některých průmyslových podnicích může docházet k odběru kapacitního jalového proudu (odběr kapacitního charakteru), v tomto případě se k regulátorům připojují dekompenzační tlumivky (Obr.: 14) kompenzující kapacitní odběr.



*Obr. 21: Dekompenzační tlumivka [5]*

Některé regulátory dnes mohou sledovat výskyt harmonických složek proudu. Mohou tak vyhodnotit zkreslení a poškození kompenzačních zařízení. Aby nedošlo k poškození kompenzačního zařízení, je regulátor toto zařízení schopen odpojit. Regulátory umožňují i měření provozní teploty, výběr z více nastavených hodnot účinníku, spínání ventilace a další.





Obr. 22: Čelní panel regulátoru jalového výkonu [5]

### 5.1. Stupňovité řízení

Nejčastější problematika u stupňovitého řízení je volba počtu a velikosti stupňů. Při volbě počtu stupňů se dbá na velikost jednoho stupně, na potřebný rozsah kompenzačního výkonu a na požadovanou hodnotu vykompenzování. Hodnota vykompenzování bývá nejčastěji  $\cos\varphi=0,95$  a větší nebo také hodnota  $\tan\varphi=0,33$  a menší.

$$\frac{Q_L - N \cdot Q_{C1}}{P} \leq \tan\varphi \quad (5.1)$$

kde

$Q_L$  jalový induktivní výkon zátěže při činném výkonu  $P$

$Q_{C1}$  jalový výkon jednoho kompenzačního stupně

$N$  počet stupňů kompenzace

Po upravení předchozího vztahu lze určit vztah pro výpočet počtu stupňů kompenzátoru.

$$\frac{Q_L - P \cdot \tan\varphi}{Q_{C1}} \leq N$$

Tento vztah platí pro kontaktní i bezkontaktní stupňovité řízení při hladinách nízkého i vysokého napětí.

### 5.1.1. Kontaktní řízení

Podle povelů regulátoru jalového výkonu dochází k přímému připínání kondenzátorů a chráněných kompenzačních skupin ke kompenzované síti.

Připínání a odpínání probíhá pomocí stykačů. Při častém spínání ale stykače doslouží a jejich životnost je u konce. Velkou nevýhodou stykačů je možný vznik přechodových jevů a proudových nárazů. Další nevýhodou kontaktních kompenzátorů je vznik rušivých jevů při sepnutí. Tyto rušivé vlivy jsou způsobeny nesynchronním spínáním. Rušivé jevy způsobují impulzní rušení citlivých elektronických zařízení. Možnost částečného odstranění těchto problémů přináší předřazení ochranných tlumivek a použití moderních spínacích prvků.

Kontaktní kompenzátory s výkonovými kondenzátory se nejvíce využívají v sítích bez výskytu harmonické složky proudu. Dále je lze použít tam, kde není požadována velká rychlost kompenzace.

### 5.1.2. Bezkontaktní řízení

Bezkontaktního spínání se užívá tam, kde jsou požadovány vyšší nároky na rychlost změny jalového výkonu. Kompenzačním kondenzátorům se musí předřazovat ochranné tlumivky. Pokud se místo klasických stykačů použije bezkontaktní spínání, pak je zapotřebí použít rychlejší regulátor jalového výkonu. Rychlost kompenzace tedy závisí na rychlosti regulátoru. Připínání a odpínání kompenzačních stupňů je podobné jako u kontaktního spínání pouze s tím rozdílem, že se vše děje mnohem rychleji.

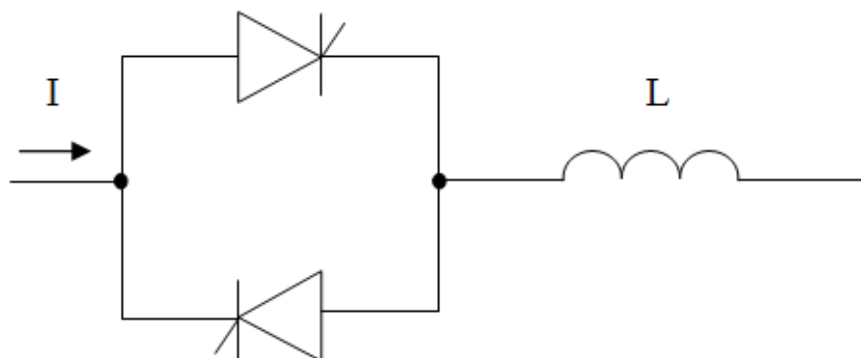
Bezkontaktního spínání se nejčastěji užívá tam, kde se často a rychle mění odebíraný výkon a účinník.

## 5.2. Plynulé řízení

### 5.2.1. Pasivní s dekompenzačními členy

Pasivní plynulé řízení lze uskutečnit za použití řízení proudu procházejícího tlumivkou. Používá se fázově řízený tyristorový spínač v antiparalelním zapojení. Plynule řízené pasivní kompenzátory jalového výkonu se nejčastěji používají při rychlých změnách kompenzačního výkonu (elektrické obloukové pece, bodové svařovací automaty a další). Proud procházející tlumivkou se vypočítá podle následujícího vztahu:

$$I_{L\max} = \frac{U_s}{\omega \cdot L} \quad (5.2)$$



Obr. 23: Schéma dekompenzačního členu [14]

### 5.2.2. Aktivní

Jedná se o paralelně nebo sériově zapojené generátory řízené vhodným regulačním systémem. Zajišťují požadovanou kompenzaci i v dynamických stavech. Paralelním zapojením aktivního filtru do sítě lze vylepšit proud. Sériovým zapojením lze vylepšit napětí a kombinací paralelního a sériového lze vylepšit napětí i proud.

**Paralelní aktivní filtr** je tvořen řízeným generátorem proudu, který je zapojený k zátěži paralelně. Odstraňuje nežádoucí harmonické proudy tak, že generuje shodné složky opačného směru. Výsledný proud je bez nežádoucích harmonických proudů.

**Sériový aktivní filtr** je tvořen generátorem napětí a je zapojen mezi svorky sítě a spotřebič. Umožňuje úpravu napětí na požadovaný tvar, a tím je dodáváno kvalitnější napětí do zátěže. Tento filtr dokáže udržovat amplitudu napětí, vyrovnává poklesy a špičky, odstraňuje také harmonické.

### 5.3. Kombinované řízení

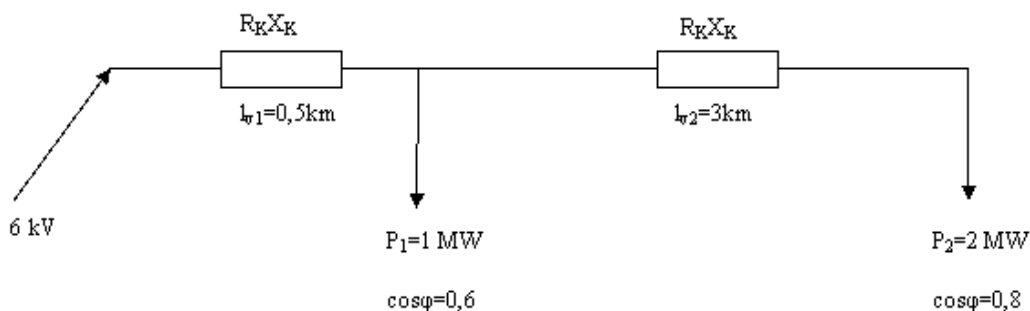
Principy kompenzátorů jalového výkonu lze různě kombinovat a lze tak docílit výborné možnosti kompenzace jalového výkonu. V praxi se nejčastěji používá kombinace stupňovitého bezkontaktního kompenzátoru a plynule řízeného kompenzátoru. [1] [10] [14]

## 6. Příklad výpočtu potřebného kompenzačního výkonu

V daném příkladu je demonstrováno, jak se změní poměry v síti před a po kompenzaci u průmyslového odběratele. Je vypočten potřebný kompenzační výkon s dosažením požadovaného účinníku.

### 6.1. Zadání příkladu

Průmyslový podnik odebírá činný výkon 1 MW a 2 MW s rozdílnými účinníky menšími než je požadovaných  $\cos\varphi=0,95$ . Napětí na výstupu z rozvodny je 6 kV. Rezistance vedení má hodnotu  $0,156 \Omega/\text{km}$  a reaktance má hodnotu  $0,33 \Omega/\text{km}$ . Průmyslový podnik požaduje navrhnout potřebný kompenzační výkon, aby byl dodržen požadovaný účinník.



### 6.2. Řešení

Příklad je řešen s požadavkem shody činného proudu před a po kompenzaci.

#### 6.2.1. Stav před kompenzací

Výpočet jalového proudu před kompenzací pro první odběr:

$$P = \sqrt{3} \cdot U_s \cdot I \cdot \cos \varphi \quad (6.1)$$

$$I_{1\varphi} = \frac{P_1}{\sqrt{3} \cdot U_N \cdot \cos \varphi_1} = \frac{1 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 6 \cdot 10^3 \cdot 0,6} = 160,37 \text{ A} \quad (6.2)$$

$$I_{1j} = I_{1\varphi} \cdot \sin[\arccos(0,6)] = 160,37 \cdot \sin[\arccos(0,6)] = 128,29 \text{ A} \quad (6.3)$$

**Výpočet jalového proudu před kompenzací pro druhý odběr:**

$$I_{1\varepsilon} = \frac{P_2}{\sqrt{3} \cdot U_N \cdot \cos \varphi_2} = \frac{2 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 6 \cdot 10^3 \cdot 0,8} = 240,56 A$$

$$I_{1j} = I_{1\varepsilon} \cdot \sin[\arccos(0,8)] = 240,56 \cdot \sin[\arccos(0,6)] = 144,34 A$$

$$\begin{aligned} \hat{I}_1 &= I_1 \cdot \cos \varphi_1 - j \cdot I_1 \cdot \sin \varphi_1 = \\ \hat{I}_1 &= 160,37 \cdot 0,6 - j \cdot 160,37 \cdot \sin[\arccos(0,6)] = \\ \hat{I}_1 &= (96,22 - j \cdot 128,3) A \end{aligned} \quad (6.4)$$

$$\begin{aligned} \hat{I}_2 &= I_2 \cdot \cos \varphi_2 - j \cdot I_2 \cdot \sin \varphi_2 = \\ \hat{I}_2 &= 240,56 \cdot 0,8 - j \cdot 240,56 \cdot \sin[\arccos(0,8)] = \\ \hat{I}_2 &= (192,5 - j \cdot 144) A \end{aligned}$$

$$\hat{I} = \hat{I}_1 + \hat{I}_2 = (288,7 - j \cdot 272,3) A$$

**Výpočet úbytku napětí před kompenzací:**

$$\begin{aligned} \Delta U_1 &= \sqrt{3} \cdot (R_K \cdot l_{v1} \cdot I_{\varepsilon} + X_K \cdot l_{v1} \cdot I_j) = \\ \Delta U_1 &= \sqrt{3} \cdot (0,156 \cdot 0,5 \cdot 288,7 + 0,33 \cdot 0,5 \cdot 272,3) = 116,82 V \end{aligned} \quad (6.5)$$

$$\begin{aligned} \Delta U_2 &= \sqrt{3} \cdot (R_K \cdot l_{v2} \cdot I_{\varepsilon 2} + X_K \cdot l_{v2} \cdot I_{j2}) = \\ \Delta U_2 &= \sqrt{3} \cdot (0,156 \cdot 3 \cdot 192,5 + 0,33 \cdot 3 \cdot 144) = 402,96 V \end{aligned}$$

$$\Delta U = \Delta U_1 + \Delta U_2 = 519,78 V \quad (6.6)$$

$$\Delta U_{\%} = \Delta u_{\%} = \frac{\Delta U}{\Delta U_N} \cdot 100 = \frac{519,78}{6 \cdot 10^3} \cdot 100 = 8,66\% \quad (6.7)$$

### 6.2.2. Stav po kompenzaci

**Výpočet jalového proudu po kompenzaci pro první odběr:**

Musí se dodržet rovnost:  $\cos \varphi_1 \cdot I_1 = \cos \varphi_K \cdot I_{1K}$

$$I_{1K} = I_1 \cdot \frac{\cos \varphi_1}{\cos \varphi_K} = 160,37 \cdot \frac{0,6}{0,95} = 101,28 A \quad (6.8)$$

$$I_{1jK} = I_{1K} \cdot \sin[\arccos(0,95)] = 101,28 \cdot \sin[\arccos(0,95)] = 31,62 A$$

**Výpočet jalového proudu po kompenzaci pro druhý odběr:**

$$\cos \varphi_2 \cdot I_2 = \cos \varphi_K \cdot I_{2K}$$

$$I_{2K} = I_2 \cdot \frac{\cos \varphi_2}{\cos \varphi_K} = 240,56 \cdot \frac{0,8}{0,95} = 202,57 A$$

$$I_{2jK} = I_{2K} \cdot \sin[\arccos(0,95)] = 202,57 \cdot \sin[\arccos(0,95)] = 63,25 A$$

**Výpočet kompenzačního proudu pro první odběr:**

$$I_{1C} = I_{1j} - I_{1jK} = 128,29 - 31,62 = 96,67 A \quad (6.9)$$

**Výpočet kompenzačního proudu pro druhý odběr:**

$$I_{2C} = I_{2j} - I_{2jK} = 144,34 - 63,25 = 81,09 A$$

$$\hat{I}_{1K} = I_{1K} \cdot \cos \varphi_K - j \cdot I_{1K} \cdot \sin \varphi_K =$$

$$\hat{I}_{1K} = 101,28 \cdot 0,95 - j \cdot 101,28 \cdot \sin[\arccos(0,95)] = (96,2 - j \cdot 31,6) A$$

$$\hat{I}_{2K} = I_{2K} \cdot \cos \varphi_K - j \cdot I_{2K} \cdot \sin \varphi_K =$$

$$\hat{I}_{2K} = 202,57 \cdot 0,95 - j \cdot 202,57 \cdot \sin[\arccos(0,95)] = (192,5 - j \cdot 63,3) A$$

$$\hat{I}_K = \hat{I}_{1K} + \hat{I}_{2K} = (288,7 - j \cdot 94,9) A$$

**Výpočet úbytku napětí po kompenzaci:**

$$\Delta U_{1K} = \sqrt{3} \cdot (R_K \cdot l_{v1} \cdot I_{\varepsilon 1K} + X_K \cdot l_{v1} \cdot I_{j1K}) =$$

$$\Delta U_{1K} = \sqrt{3} \cdot (0,156 \cdot 0,5 \cdot 288,7 + 0,33 \cdot 0,5 \cdot 94,9) = 66,12 V$$

$$\Delta U_{2K} = \sqrt{3} \cdot (R_K \cdot l_{v2} \cdot I_{\varepsilon 2K} + X_K \cdot l_{v2} \cdot I_{j2K}) =$$

$$\Delta U_{2K} = \sqrt{3} \cdot (0,156 \cdot 3 \cdot 192,5 + 0,33 \cdot 3 \cdot 63,3) = 264,58 V$$

$$\Delta U_K = \Delta U_{1K} + \Delta U_{2K} = 330,7V$$

$$\Delta u_{K\%} = \frac{\Delta U_K}{\Delta U_N} \cdot 100 = \frac{330,7}{6 \cdot 10^3} \cdot 100 = 5,5\%$$

**Výpočet výkonu kompenzační baterie pro první odběr:**

$$Q_{1C} = \sqrt{3} \cdot U_N \cdot I_{1C} = \sqrt{3} \cdot 6 \cdot 10^3 \cdot 96,67 = 1,004M \text{ var} \quad (6.10)$$

**Výpočet výkonu kompenzační baterie pro druhý odběr:**

$$Q_{2C} = \sqrt{3} \cdot U_N \cdot I_{2C} = \sqrt{3} \cdot 6 \cdot 10^3 \cdot 81,09 = 0,842M \text{ var}$$

**Výpočet stupně kompenzace pro první odběr:**

$$k_1 = \frac{I_{1jK}}{I_{1j}} = \frac{31,62}{128,29} = 0,24 \quad (6.11)$$

**Výpočet stupně kompenzace pro druhý odběr:**

$$k_2 = \frac{I_{2jK}}{I_{2j}} = \frac{63,25}{144,24} = 0,44$$

## 7. Návrh kompenzace pro průmyslového odběratele

Za účelem návrhu kompenzace v průmyslovém podniku byla poskytnuta potřebná data, která jsou vyhodnocena v praktickém příkladu bakalářské práce.

### 7.1. Výsledky měření

V období dvou dnů proběhlo 48 hodinové měření hodnot veličin potřebných pro návrh kompenzačního zařízení. Měření proběhlo od půlnoci do půlnoci v minutových intervalech na hladině 6 kV v dané rozvodně. Měření proběhlo v době normálního provozu průmyslového podniku, při provozním zatížení zařízení.

Pro zpracování tohoto návrhu byly zpracovány naměřené hodnoty činného, jalového, zdánlivého výkonu a účinníku.

### 7.2. Zpracování naměřených hodnot

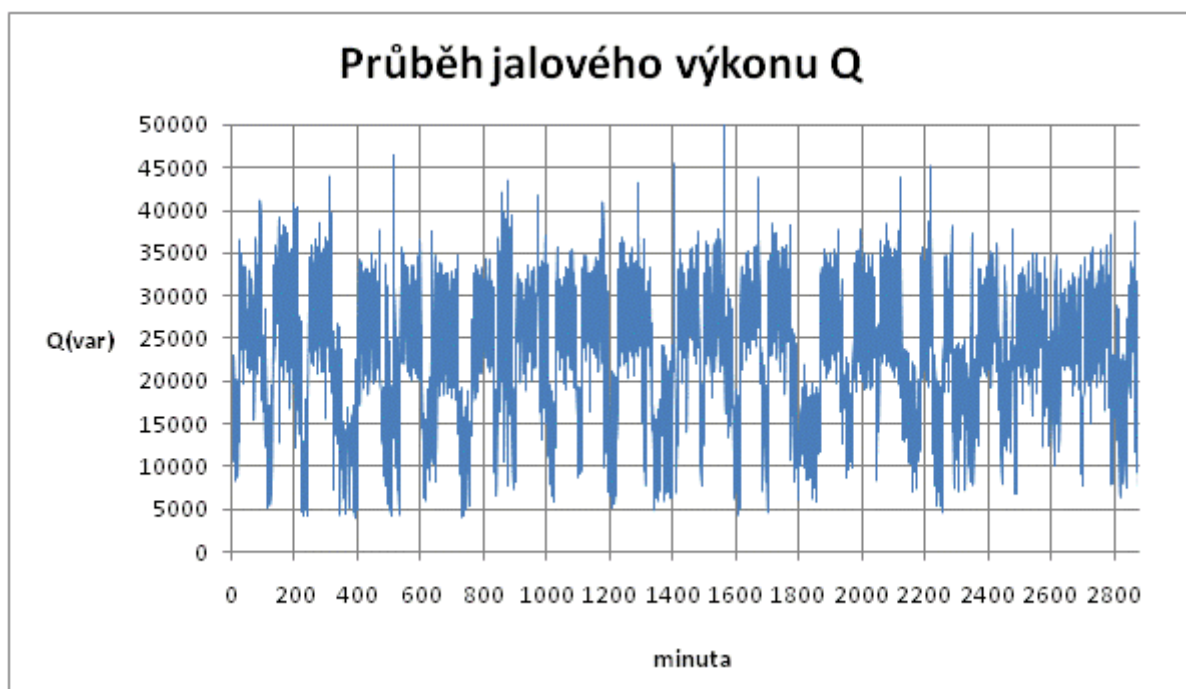
Naměřené hodnoty byly v tabulkovém editoru zpracovány a uspořádány tak, aby se s těmito daty snáze pracovalo a byly pro další zpracování přehledné. Vyhledal jsem minimální, maximální a průměrné hodnoty měřených veličin (Tab. 8.2).

Pro zpracování bylo použito 2880 vzorků jednotlivých veličin v minutových intervalech.

*Tabulka 2: Tabulka naměřených hodnot*

veličina	jednotka	měřené hodnoty		
		min	max	průměr
<b>Výkon P</b>	<b>kW</b>	<b>1,821</b>	<b>37,364</b>	<b>16,3</b>
<b>Jalový výkon Q</b>	<b>kvar</b>	<b>3,925</b>	<b>49,866</b>	<b>23,101</b>
<b>Zdánlivý výkon S</b>	<b>kVA</b>	<b>4,589</b>	<b>60,462</b>	<b>29,092</b>
<b>cosφ</b>	<b>-</b>	<b>0,244</b>	<b>0,724</b>	<b>0,503</b>



**Grafy naměřených a vypočítaných hodnot***Graf 1: Průběh výkonu  $P$* *Graf 2: Průběh jalového výkonu  $Q$*

Z grafu průběhu jalového výkonu  $Q$  lze vyčíst kolísání jalového výkonu od minimální hodnoty 3,925 Mvar až po maximální hodnotu 49,866 Mvar. Průměrná hodnota jalového výkonu se pohybuje kolem hodnoty 23,101 Mvar a průměrný účinník se pohybuje kolem hodnoty 0,503. Kolísání účinníku způsobují motory pracující naprázdno.

### 7.3. Návrh kompenzace

Ke každému naměřenému vzorku byl vypočten potřebný kompenzační výkon dle následujícího vztahu:

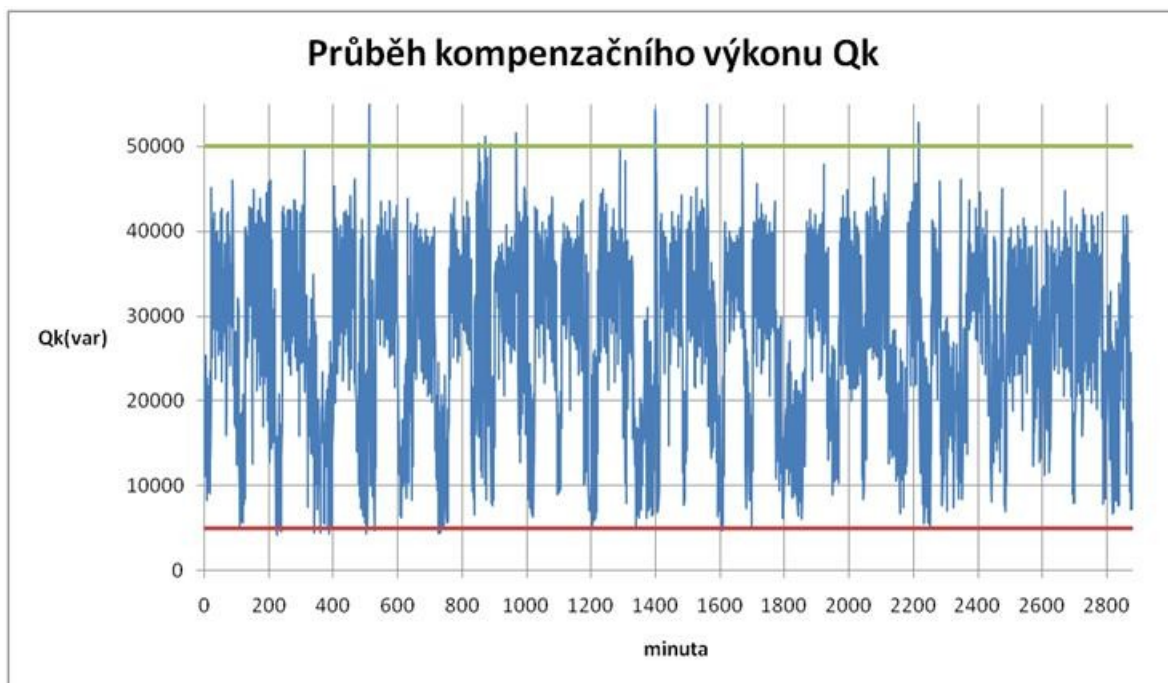
$$Q_K = P \cdot (tg \varphi_1 - tg \varphi_2) \cdot \dots [var; W, -, -]$$

kde

$Q_K$	fázový posuv před kompenzací
$P$	činný výkon
$\cos \varphi_1$	původní hodnota účinníku
$\cos \varphi_2$	požadovaný účinník

Po výpočtu potřebného kompenzačního výkonu pro každý vzorek je:

průměrná hodnota	$Q_{Kprům.}=27,264$ kvar
maximální hodnota	$Q_{Kmax}=55,904$ kvar
minimální hodnota	$Q_{Kmin}=4,273$ kvar



Graf 3: Průběh kompenzačního výkonu  $Q_K$

Minimální potřebný kompenzační výkon vypočtený z naměřených hodnot je roven 4,273 kvar. Hodnot s tak malým výkonem je velmi málo a lze je tedy kompenzovat až od hodnoty vyšší. Proto volím nejmenší stupeň kompenzace 5 kvar. Hodnot pod 5 kvar je pouze 0,52% a lze je zanedbat. Hladina 5 kvar je v grafu průběhu kompenzačního výkonu  $Q_K$  vyznačena červenou přímkou.

Maximální vypočtený kompenzační výkon je 55,904 kvar. Stejně jako minimálních hodnot je i výskyt maximálních hodnot velmi nízký. Proto je možné od hladiny 50 kvar hodnoty zanedbat. Těchto hodnot je 0,35%. Hladina 50 kvar je v grafu průběhu kompenzačního výkonu  $Q_K$  vyznačena zelenou přímkou.

## **Závěr**

Kompenzace jalového výkonu je stálou problematikou pro většinu průmyslových odběratelů, ale také pro distributory elektrické energie. Do popředí se dostává díky stále rostoucím cenám energií. Ze strany distributorů se jedná o problémy spojené s nekompenzovanými odběry elektrické energie, které způsobují ekonomickou ztrátu způsobující ztráty na vedení nebo špatné využití transformátorů. Tyto ztráty tvoří malou část ztrát od výroby až po spotřebu elektrické energie, ale hodnota těchto ztrát je řádově v miliardách kilowatthodin. Ze strany odběratelů jde o nižší náklady za odběr elektrické energie při dodržení požadované meze účinníku.

Kompenzace jalového výkonu bude i nadále stálou otázkou při snižování nákladů za odběr elektrické energie, protože velká většina spotřebičů připojených k elektrické síti je induktivního charakteru. V dnešní době je velké množství možností kompenzace a její regulace.

Pokud bude kompenzovat velká většina průmyslových odběratelů, pak se sníží ztráty, a tím dojde ke snížení emisí CO<sub>2</sub> přibližně o 2 miliony tun za rok. Tato uspořená energie z kompenzace by pak postačila na zásobování všech domácností v České republice přibližně na čtvrt roku. Energetická účinnost v elektroenergetice je důležitou otázkou blízké budoucnosti a kompenzace jalového výkonu může tvořit hlavní část jejího řešení a přispěje také k ochraně životního prostředí.

## Literatura

- [1] KORENC, Vladimír, HOLOUBEK, Jiří. *Kompenzace jalového výkonu v praxi. 1. vydání.* Praha: IN-EL, 1999. 123 stran. ISBN 80-86230-07-4.
- [2] BLAŽEK, Vladimír, SKALA, Petr. *Distribuce elektrické energie* (skriptum). Brno. Vysoké učení technické v Brně. 136 stran.
- [3] HODINKA, Miloslav, FECKO, Štefan, NĚMEČEK, František. *Přenos a rozvod elektrické energie.* SNTL, Praha, 1989. ISBN 80-03-00065-3.
- [4] KOUDELKA, Ctirad. *Elektrický silnoproudý rozvod v průmyslových provozovnách* (skriptum). Ostrava. Vysoká škola báňská-Technická univerzita Ostrava.
- [5] KBH Energy s.r.o. [online]. [cit. 2012-11-02]. Dostupné z: <http://www.kbhcz/>
- [6] EMCOS: Kompenzace - monitorování a úspory elektrické energie. [online]. [cit. 2012-11-23]. Dostupné z: [http://www.emcos.cz/pdf/E07\\_0801\\_HANZLIK.pdf](http://www.emcos.cz/pdf/E07_0801_HANZLIK.pdf)
- [7] SKUPINA ČEZ: Z elektrárny do zásuvky. [online]. [cit. 2013-01-16]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/edee/content/microsites/elektrina/4-4.htm>
- [8] ODBORNÉ ČASOPISY: Individuální kompenzace jalového výkonu. [online]. [cit. 2013-01-28]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/38789.pdf>
- [9] ZEZ SILKO,s.r.o.: Power Capacitors [online]. [cit. 2012-01-20]. Dostupné z: <http://www.zez-silko.cz/>
- [10] ODBORNÉ ČASOPISY: Kompenzace elektrického jalového výkonu. [online]. [cit. 2012-01-09]. Dostupné z: [http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id\\_document=38682](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=38682)
- [11] ODBORNÉ ČASOPISY: Životnost kompenzačních zařízení. [online]. [cit. 2013-02-08]. Dostupné z: [http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id\\_document=45011](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=45011)
- [12] WEB.TELECOM: Vedení VN a vyšší - parametry vedení. [online]. [cit. 2012-10-09]. Dostupné z: [http://web.telecom.cz/tyrbach/vvn\\_parametry.pdf](http://web.telecom.cz/tyrbach/vvn_parametry.pdf)
- [13] WEB.TELECOM: Umístění kondenzátorové baterie. [online]. [cit. 2012-10-21]. Dostupné z: [http://web.telecom.cz/tyrbach/komp-umisteni\\_bat.pdf](http://web.telecom.cz/tyrbach/komp-umisteni_bat.pdf)
- [14] Vlastní poznámky

## Seznam obrázků

Obr. 1: Přenosová síť 400 kV a 220 kV v České republice.....	4
Obr. 2: Distribuční síť .....	5
Obr. 3: Paprsková síť .....	6
Obr. 4: Průběžný rozvod .....	7
Obr. 5: Okružní rozvod .....	7
Obr. 6: Mřížový rozvod.....	8
Obr. 7: Náhradní schéma vedení .....	9
Obr. 8: Kroucení vedení z důvodu stejných parametrů nesouměrných 3 fázových sítí .....	12
Obr. 9: Vybrané druhy izolantů.....	13
Obr. 10: Trojúhelník výkonu.....	14
Obr. 11: Trojúhelník výkonu před a po kompenzaci.....	17
Obr. 12: Schéma paralelní kompenzace .....	21
Obr. 13: Fázorový diagram paralelní kompenzace.....	22
Obr. 14: Kompenzační rozvaděč .....	23
Obr. 15: Zapojení kompenzačního zařízení při individuální kompenzaci.....	24
Obr. 16: Zapojení kompenzačního zařízení při skupinové kompenzaci.....	24
Obr. 17: Zapojení kompenzačního zařízení při centrální kompenzaci .....	25
Obr. 18: Kompenzační kondenzátory pro NN.....	26
Obr. 19: Kompenzační kondenzátory pro VN.....	27
Obr. 20: V-křivky synchronního motoru.....	28
Obr. 21: Dekompenzační tlumivka .....	29
Obr. 22: Čelní panel regulátoru jalového výkonu .....	30
Obr. 23: Schéma dekompenzačního členu .....	32

---

## Seznam tabulek

Tabulka 1: Platba za nedodržení požadované hodnoty účínku .....	20
Tabulka 2: Tabulka naměřených hodnot .....	37

**Seznam grafů**

Graf 1: Průběh výkonu $P$ .....	38
Graf 2: Průběh jalového výkonu $Q$ .....	38
Graf 3: Průběh kompenzačního výkonu $Q_K$ .....	40



## Seznam příloh

I Příloha č. 1. - Rozvodná síť v České republice [13]

